

ХІМІЧНА ІНЖЕНЕРІЯ

УДК 66.021.4, 678.027.2, 676.056.71, 66.011

ПОДИМАН Г. С.*, КОРНІЄНКО Я. М., СЕМІНСЬКИЙ О. О.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ОБҐРУНТУВАННЯ МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ КАЛІБРУВАЛЬНОЇ ГІЛЬЗИ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ТРУБ З ТЕРМОПЛАСТІВ

Задача підвищення якості виготовлення труб для інженерних мереж різного призначення з прогнозованою продуктивністю набуває особливого значення при підвищеному попиту в сучасних умовах. Значний вплив на вирішення цієї задачі знаходиться в організації теплообміну в каліброваному пристрої. На основі теоретичного аналізу теплообміну при калібруванні труб запропоновано удосконалену методику, яка полягає розрахунку поля температур в стінці трубної при русі трубної заготовки через різні зони калібратора при контрольованому термічному опорі між поверхнями полімерної труби та калібратора. Такий підхід дозволяє визначити інтенсивність відведення теплоти, в залежності від стану матеріалу труби при затвердінні при заданій швидкості руху заготовки, з урахуванням зміни теплофізичних властивостей матеріалу труби та більш точно визначити раціональну поверхню теплообміну в калібраторі, яка виражається в довжині його гільзи.

Запропоновану методику апробовано при розрахунку калібратора при виробництві труби з поліетилену діаметром 500 мм і товщиною стінки 30 мм з швидкістю виготовлення труб 8 м/хв. в якому розрахункова довжина становить 862 мм, робоча довжина гільзи становить 880 мм, збіжність становить 98 %.

Ключові слова: гільза калібрувальна, полімер, теплообмін, термопласт, труба

DOI: 10.20535/2617-9741.2.2024.307351

*Corresponding author: podiman_g_s@ukr.net

Received 23 April 2024; Accepted 22 May 2024

Постановка проблеми. В сучасному світі трубна продукція з термопластичних матеріалів впевнено витісняє вироби з інших матеріалів, насамперед металів, які тривалий час домінували на ринку, що стали все частіше використовуватись при прокладанні водо-, тепло-, електропостачання, вентиляції, тощо. Виготовлення продукції, що буде відповідати усім нормам, неможлива без якісного обладнання.

При виготовленні труб з термопластів як формувальні інструменти використовують формуючі головки та калібрувальні гільзи. Причому геометричні параметри труб, а отже їх якісні показники і вигляд, забезпечують калібратори. Встановлено [1], що для забезпечення ефективного калібрування потрібно враховувати, що:

- інтенсивність відведення теплоти залежить від термічного контакту між трубною заготовкою, що калібрується, та внутрішньою стінкою калібрувальної гільзи;
- несуча здатність труби, що калібрується, повинна бути достатньою, для подолання сил тертя та залежить від профілю температурних полів в стінці труби;
- тривалість термічного контакту заготовки труби з розплаву термопластів має бути достатньою для збереження форми та розмірів труби після виходу з калібрувального пристрою;
- для збільшення продуктивності екструзійної лінії калібрувальний пристрій має забезпечити максимально інтенсивне охолодження та мінімальну силу тертя труби в калібрувальній гільзі при достатньо тривалому збереженні термічного контакту.

Отже задача забезпечення інтенсивного теплообміну в калібрувальному пристрої одна з головних при виготовленні труб із заданими властивостями, через удосконалення методики розрахунку.

Аналіз попередніх досліджень. Процес теплообміну в калібраторі нестационарний і супроводжується утворенням затверділого шару термопласту (склуванням).

В роботі [1] для розрахунку температурного поля пропонується одновимірне рівняння нестационарної теплопровідності:

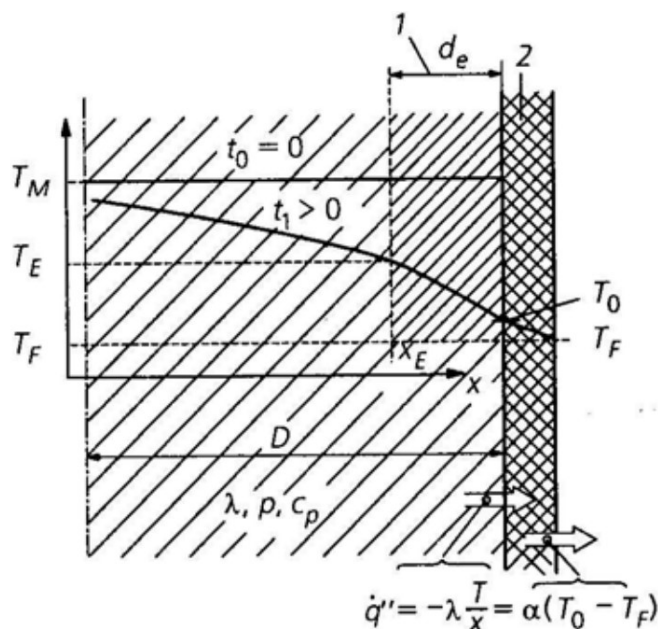
$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(a \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad (1)$$

де $\frac{\partial T}{\partial t}$ – зміна температури матеріалу стінки труби у часі, К/с; $\frac{\partial T}{\partial x}$ – градієнт температури в матеріалі стінки труби в радіальному напрямку, К/с; a – коефіцієнт теплопровідності, м²/с.

Рівняння (1) доповнюється граничними умовами II роду для розплаву, що приклеюється до стінки калібрувальної гільзи, [1]:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=D} = \alpha (T_0 - T_F), \quad (2)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу труби, Вт/(м·К); α – коефіцієнт тепловіддачі від поверхні труби до охолоджувальної рідини, Вт/(м²·К); T_0 – температура поверхні труби, яка калібрується, К; T_F – температура охолоджувальної рідини, К (рис. 1).



1 - затверділий шар; 2 - калібрувальна гільза; інші позначення в тексті

Рис. 1 – Схема охолодження екструдованої труби [1]

Розв'язання рівнянь (1) та (2) можливе з використанням числових методів кінцевих різниць, або кінцевих елементів, з прив'язкою до поточної довжини калібрувального пристрою. Оскільки у стінки калібрувальної гільзи, у трубного профілю термопласту різні значення теплопровідності та товщини шарів, то гранична умова вносить в розрахунок похибку.

У роботах [2,3] використовують для моделювання переносу тепла від труби з полімеру граничні умови III роду і явну схему розв'язку методу кінцевих різниць.

Числові методи дозволяють розв'язати рівняння нестационарної теплопровідності з врахуванням залежностей теплофізичних параметрів від температури [3]. Теплоту утворення надмолекулярних структур

(склування) у рівнянні нестационарної теплопровідності шляхом використання параметру «ефективна температуропровідність»:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a^* \left[\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right] \quad (3)$$

де $a^*(T) = \frac{\lambda(T)}{\rho(T)C_p(T)}$ – ефективний коефіцієнт температуропровідності, який враховує теплоту

склування термопласту, м²/с; $C_p(T)$ – теплоємність термопласту, Дж/кг·К; $C_p^*(T)$ – ефективна теплоємність термопласту, Дж/кг·К; $\lambda(T)$ – теплопровідність термопласту, Вт/(м·К); $\rho(T)$ – густина термопласту, кг/м³.

В роботі [4], досліджено коефіцієнт теплопередачі між трубою з термопласту та охолоджуючою рідиною. Як зазначено в цій роботі, термопласти мають низьку теплопровідність, що робить теплообмін ускладненим і теплопередача часто лімітує швидкість процесу.

Авторами [5] експериментально досліджено термічний опір контакту між полімером та внутрішньою поверхнею калібрувальної гільзи (рис. 2).

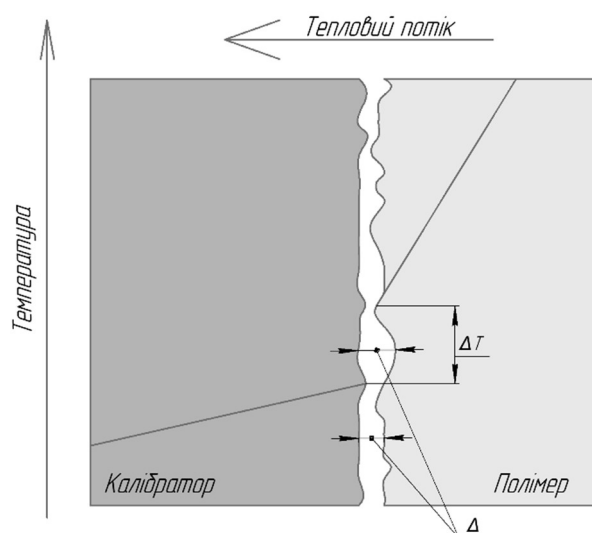


Рис. 2 – Схема теплообміну між двома поверхнями, які не перебувають в ідеальному контакті [5]

Теплота, що відводиться від трубної заготовки, має вигляд [5]:

$$q = K \cdot \Delta t \quad (4)$$

де $\Delta t = \frac{(t_{1p} - t_{1v}) - (t_{2p} - t_{2v})}{\ln \left(\frac{(t_{1p} - t_{1v})}{(t_{2p} - t_{2v})} \right)}$ – різниця температури, К; K – коефіцієнт теплопередачі, що визначається за

формулою [5]; t_{1p} , t_{2p} – температура трубної заготовки на вході та на виході з калібрувальної гільзи, К; t_{1v} , t_{2v} – початкова та кінцева температура охолоджуючої води, К.

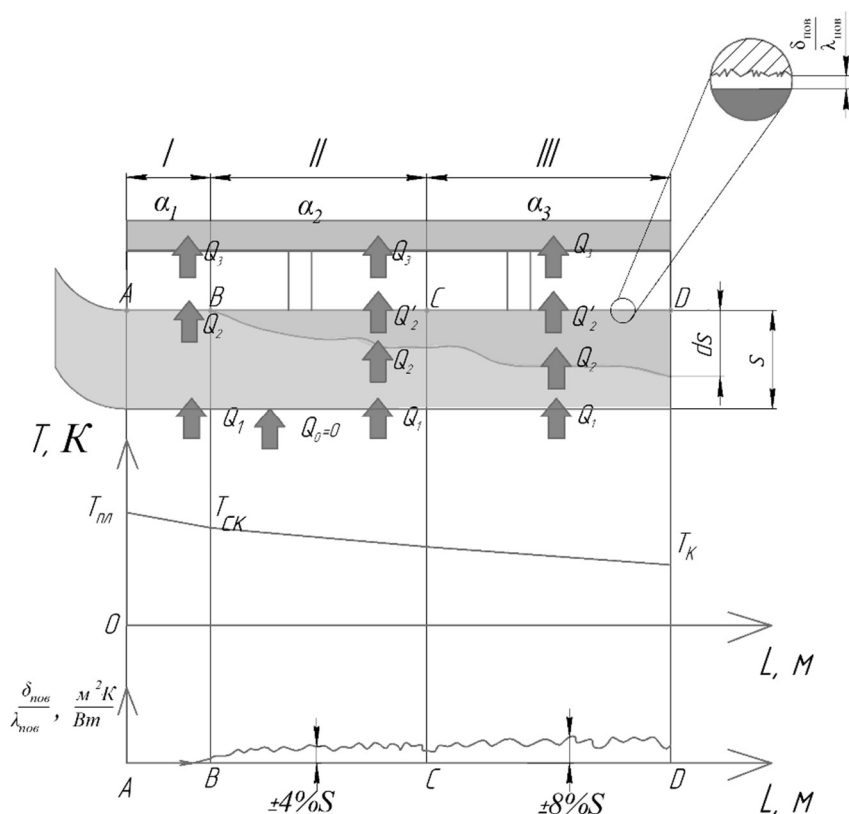
$$K = \frac{1}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \Delta + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_{\text{води}}}} \quad (5)$$

де δ_1, δ_2 – товщини затверділого шару полімеру й калібрувальної гільзи, м; λ_1, λ_2 – теплопровідності затверділого шару полімеру й калібрувальної гільзи, Вт/(м·К); Δ – термічний опір повітря, що знаходиться між трубною заготовкою та внутрішньою стінкою калібрувальної гільзи, 1/К; $\alpha_{\text{води}}$ – коефіцієнт температуропровідності води, з урахуванням перфорації, м²/с.

Процес охолодження полімерної трубної заготовки супроводжується затвердінням поверхневого шару полімеру та усадкою, що призводить до збільшення зазору між поверхнею труби та калібрувальної гільзи, що зумовлює збільшення термічного опору для процесу теплообміну. Окрім цього, недостатня механічна міцність утвореного твердого шару на поверхні полімерної труби через низьку ефективність охолодження може призвести до руйнування виробу під дією зусиль тягучого пристрою і до зниження продуктивності лінії.

Метою дослідження полягає в удосконаленні методики розрахунку калібрувальної гільзи для труб з термопластів.

Виклад основного матеріалу. Процес теплообміну при калібруванні трубної заготовки схематично зображений на рис. 3. При цьому проходження процесу теплообміну уявно розділено на 3 зони: 1-ша зона (відрізок АВ) – відповідає швидкому формуванню твердої плівки на поверхні заготовки; 2-га зона (відрізок ВС) – відповідає початку використання розрідження (з плавним збільшенням) для забезпечення мінімального термічного опору та заданого геометричного вигляду; 3-тя зона (CD) – відповідає проведенню процесу з максимальним значенням розрідження та завершенню підготовки трубної заготовки для подальшого охолодження.



ds – змінна товщина затверділого шару полімеру; S – товщина стінки трубної заготовки

Рис. 3 – Фізична модель процесів теплообміну в калібрувальній гільзі екструдованої труби з термопластів

Тоді тепловий баланс матиме такий вигляд:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2)WC_{n(t)}(T_n - T_k)\rho_{n(t)} \quad (6)$$

де Q_1, Q_2, Q_3 – теплота, яка відводиться в зонах I, II і III, Вт; D, d – зовнішній та внутрішній діаметри труби, яка виходить з калібрувальної гільзи, м; W – швидкість руху трубної заготовки через калібрувальну гільзу, м/с; $C_{n(t)}$ – теплоємність полімеру, яка залежить від температури, Дж/(кг·К); $\rho_{n(t)}$ – густина полімера, яка залежить від температури, кг/м³; T_n – температура полімеру при входженні до калібрувальної гільзи, К; T_k – температура полімеру при виході з калібрувальної гільзи, К.

Термічний опір для зони I, відповідно до [5]:

$$R_I = \frac{\delta_{III}}{\lambda_{III}} + \frac{\delta_{КАЛ}}{\lambda_{КАЛ}} + \frac{1}{\alpha_1} \quad (7)$$

де δ_{III} – товщина стінки трубної заготовки з плаву полімеру, м; λ_{III} – коефіцієнт теплопровідності розплаву полімеру, Вт/(м·К); $\delta_{КАЛ}$ – товщина стінки калібрувальної гільзи, м; $\lambda_{КАЛ}$ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу калібрувальної гільзи, Вт/(м·К); α_1 – коефіцієнт тепловіддачі від поверхні труби до охолоджувальної рідини, Вт/(м²·К)

Термічний опір для зони II, відповідно до [5]:

$$R_{II} = \frac{\delta_{III}}{\lambda_{III}} + \frac{\delta_T}{\lambda_T} + \frac{\delta_{нов}}{\lambda_{нов}} + \frac{\delta_{КАЛ}}{\lambda_{КАЛ}} + \frac{1}{\alpha_2} \quad 0 \leq \delta_{нов} \leq [\delta] \approx 4\% \cdot \delta_{труби} \quad (8)$$

де δ_T – товщина затверділого шару полімеру, м; λ_T – коефіцієнт теплопровідності затверділого шару полімеру, Вт/(м·К); $\delta_{нов}$ – товщина зазору між трубною заготовкою та калібрувальною гільзою, м; $\lambda_{нов}$ – коефіцієнт теплопровідності повітря, що знаходиться в зазору між трубною заготовкою та калібрувальною гільзою, Вт/(м·К); α_2 – коефіцієнт тепловіддачі від поверхні труби до охолоджувальної рідини, Вт/(м²·К); $[\delta]$ – допустимий зазор, м; $\delta_{труби}$ – товщина стінки трубної заготовки, м

Термічний опір зони III, відповідно до [5]:

$$R_{III} = \frac{\delta_{III}}{\lambda_{III}} + \frac{\delta_T}{\lambda_T} + \frac{\delta_{нов}}{\lambda_{нов}} + \frac{\delta_{КАЛ}}{\lambda_{КАЛ}} + \frac{1}{\alpha_3} \quad \delta_{нов} \leq [\delta] \approx 8\% \cdot \delta_{труби} \quad (9)$$

де α_3 – коефіцієнт тепловіддачі від поверхні труби до охолоджувальної рідини, Вт/(м²·К).

В рівняннях (8) та (9) термічний опір приймається, відповідно, на рівнях 4 % та 8 % від товщини стінки трубної заготовки, що необхідно для забезпечення якісного теплообміну й мінімального тертя труби з калібрувальною гільзою [6].

Для апробації методики проведемо порівняльний розрахунок з робочою калібрувальною гільзою, що встановлена на лінії виробництва труб з термопластів на ТОВ «Перший трубний завод». Для цього зазначимо:

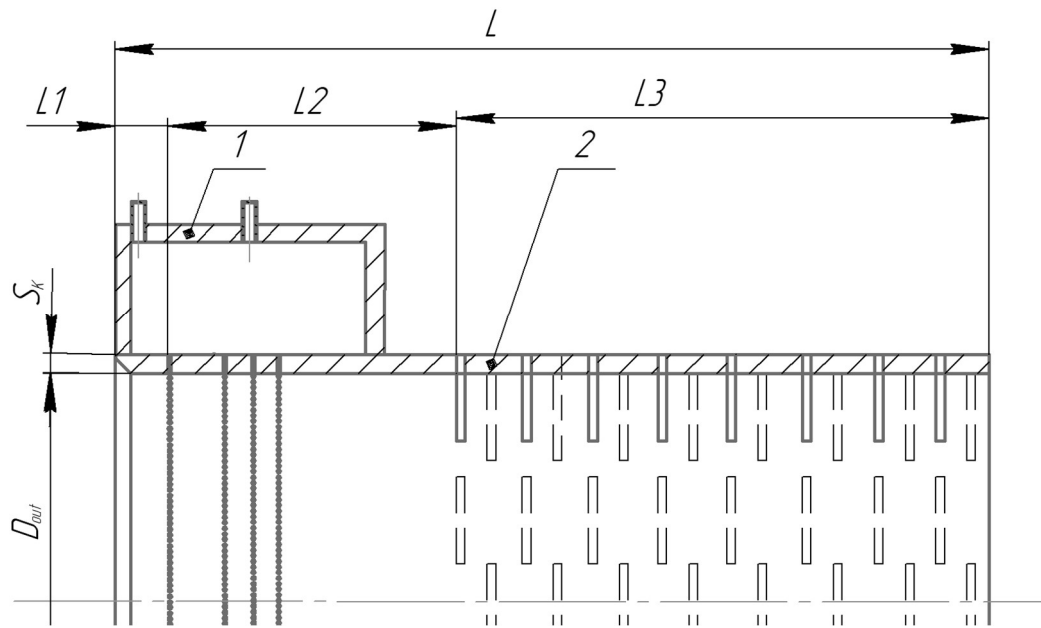
- оскільки у термопластів змінюються теплофізичні характеристики зі зміною температури, ці зміни необхідно включити в рівняння (5)-(9);

- для розрахунку використовується розрахункова схема (рис. 4) та алгоритм розрахунку (рис. 5).

Для порівняльного розрахунку прийнято вихідні дані, наведені в таблиці 1, які відповідають параметрам реальної трубної лінії.

Методика розрахунку реалізована у вигляді програми засобами мови Python.

Відповідно до розрахунків за запропонованою методикою обчислено температурні поля труби при калібруванні та їх зміну у часі. Приклад температурного поля для труби, що розраховується, при проходженні калібрувальної гільзи протягом 5 секунд наведений на рис. 6. Результати розрахунків свідчать, що за даний час товщина затверділого термопласту складає 3 мм, що достатньо для протягування трубної заготовки через калібрувальну гільзу.



1 – перша камера розрідження; 2 – калібрувальна гільза

Рис. 4 – Схема розрахунку

Таблиця 1 – Вихідні параметри для розрахунку

Параметр	Індекс	Значення
Матеріал калібрувальної гільзи		БрАЖ9-4
Внутрішній діаметр гільзи, мм	D_{out}	500
Товщина стінки трубної заготовки, мм	S	0,03
Матеріал трубної заготовки		Поліетилен високої густини марки НХФ-4810Н
Швидкість калібрування, м/хв	W	8
Початкова температура охолоджуючої води, °С	t_{1v}	20
Кінцева температура охолоджуючої води, °С	t_{2v}	40
Температура трубної заготовки на вході в калібрувальну гільзу, °С	t_{1p}	250
Температура трубної заготовки на виході з калібрувальної гільзи, °С	t_{2p}	70
Температура склування полімеру, °С	t_{sk}	135

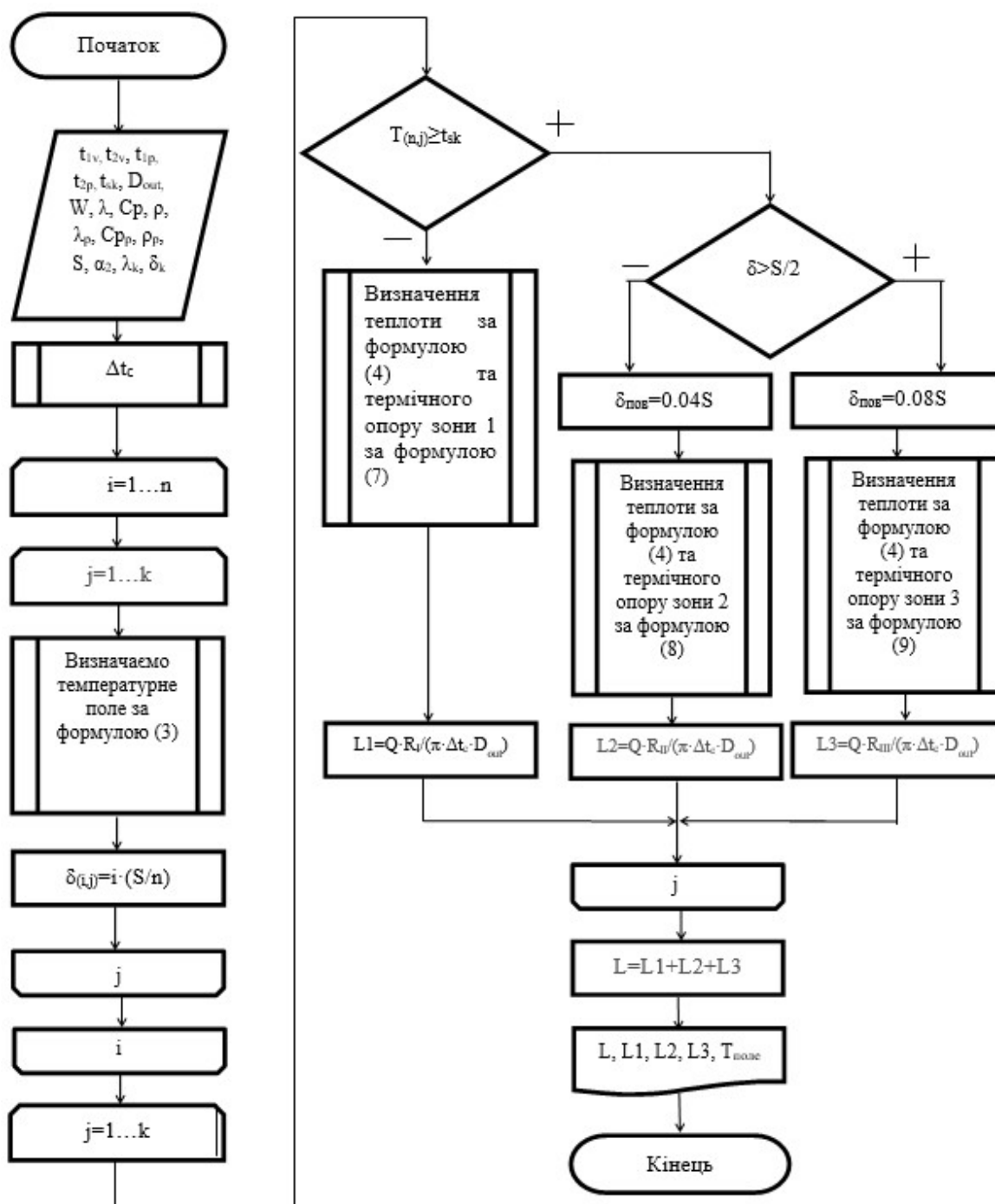


Рис. 5 – Блок-схема розрахунку калібрувальної гільзи

Визначена довжина калібрувальної гільзи становить 0,862 м, що майже відповідає значенню довжини промислової калібрувальної гільзи, яка дорівнює 0,880 м. Відносна похибка розрахунку складає 2 %, що свідчить про його високу збіжність і дозволяє рекомендувати запропоновану методику для визначення параметрів калібрувальних гільз.

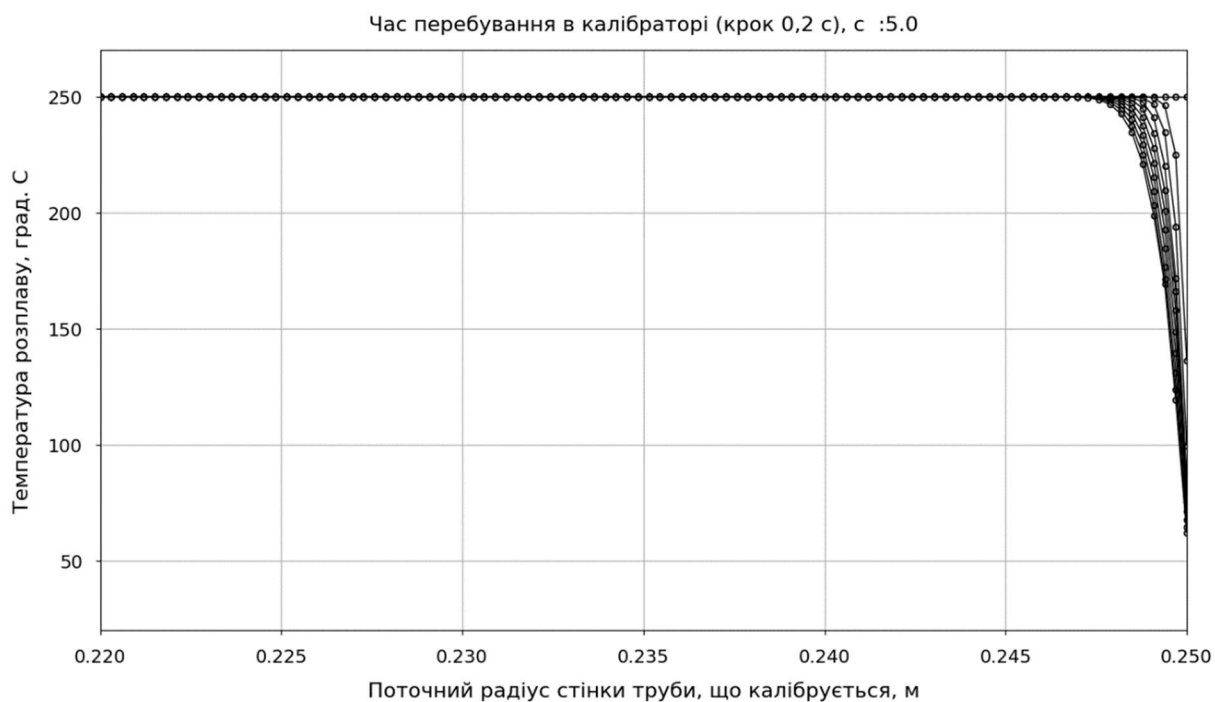


Рис. 6 – Температурне поле у стінці труби при виході трубної заготовки із зони III в калібрувальній гільзі протягом 5 с розрахований за наведеною методикою

Порівняння результатів розрахунку за удосконаленою методикою з експериментальними проводились за однакових технічних умов, що розписані в таблиці 1 за розрідження, що досягало 0,05 МПа.

Висновки. За результатами дослідження теоретично обґрунтовано удосконалену методику розрахунку калібрувальних гільз для виробництва труб з термопластів, яка враховує зміну теплофізичних властивостей термопласту, при охолодженні трубної заготовки в калібрувальній гільзі. Застосування запропонованої методики дозволяє визначити температурні поля і геометричні параметри калібрувальних гільз. Надійність методики підтверджено розрахунком промислової калібрувальної гільзи для труби діаметром 0,5 м зі збіжністю в 98 %.

Перспективи подальших досліджень. Метою продовження експерименту є перевірка для іншої номенклатури продукції (інших діаметрів) та інших термопластів.

Список використаної літератури

1. Piorkowska, E., & Galeski, A. Modeling of polymer crystallization in plates, pipes, and rods during cooling. *Journal of Applied Polymer Science*, 86(6), 1363–1372 (2002). <https://doi.org/10.1002/app.11277>
2. Amjadi, M., & Fatemi, A. Creep and Fatigue Behaviors of High-Density Polyethylene (HDPE): Effects of Temperature, Mean Stress, Frequency, and Processing Technique. *International Journal of Fatigue*, 141, p.105871 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.105871>.
3. Woo, M. W., Wong, P., Tang, Y., Triacca, V., Gloor, P. E., Hrymak, A. N., & Hamielec, A. E. Melting behavior and thermal properties of high density polythylene. *Polymer Engineering and Science*, 35(2), 151–156 (1995). <https://doi.org/10.1002/pen.760350205>.
4. Marinho, V. A. D., Cesario, L. V., Costa, A. R. M., Carvalho, L. H., Almeida, T. G., & Canedo, E. L. Heat transfer coefficient in internal mixers for different polymers and processing conditions. *Chemical Engineering Research and Design* 152, 466-473 (2019) <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2019.09.025>
5. Carneiro, O. S., Nóbrega, J. M., Mota, A. R., & Silva, C. Prototype and methodology for the characterization of the polymer-calibrator interface heat transfer coefficient. *Polymer Testing*, 32(6), 1154–1161 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2013.07.006>

6. Walter Michaeli. Extrusion Dies for Plastics and Rubber: Design and Engineering Computations. Computer Aided Engineering for Polymer Processing, *Hanser Publishers*, 1992. – p. 340.02
 7. Двойнос, Я. Г., Подиман, Г. С., & Рудницький, Б. А. Розрахунок теплообмінних процесів при каландруванні листів з поліетилену. *Вісник НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського». Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження*, (4), 9–16 (2020). <https://doi.org/10.20535/2617-9741.4.2020.219779>
-

Hryhorii Podyman, Yaroslav Kornienko, Oleksandr Seminskii

JUSTIFICATION OF THE METHOD FOR CALCULATING THE CALIBRATION SLEEVE FOR THE PRODUCTION OF THERMOPLASTIC PIPES

The task of improving the quality of the production of pipes for engineering networks of various purposes with forecasting performance takes on special importance in the face of increased demand in modern conditions. A significant influence on the solution of this problem is found in the organization of heat exchange in the calibrated device. Based on the theoretical analysis of heat exchange during pipe calibration, an improved method is proposed, which consists of calculating the temperature field in the pipe wall during the movement of the pipe billet through different zones of the calibrator with controlled thermal resistance between the surfaces of the polymer pipe and the calibrator.

This approach makes it possible to determine the intensity of heat removal, depending on the state of the pipe material during solidification at a given speed of movement of the workpiece, taking into account the change in the thermophysical properties of the pipe material and to more accurately determine the rational heat exchange surface in the calibrator, which is expressed in the length of its sleeve.

The proposed method was approved when calculating the calibrator during the production of a polyethylene pipe with a diameter of 500 mm and a wall thickness of 30 mm with a pipe production speed of 8 m/min. in which the calculated length is 862 mm, the working length of the sleeve is 880 mm, the convergence is 98 %.

Keywords: calibration sleeve, polymer, heat exchange, thermoplastic, pipe

References

1. Piorkowska, E., & Galeski, A. (2002), «Modeling of polymer crystallization in plates, pipes, and rods during cooling», *Journal of Applied Polymer Science*, 86(6), 1363–1372. <https://doi.org/10.1002/app.11277>
2. Amjadi, M., & Fatemi, A. (2020), «Creep and Fatigue Behaviors of High-Density Polyethylene (HDPE): Effects of Temperature, Mean Stress, Frequency, and Processing Technique», *International Journal of Fatigue*, 141, p.105871. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.105871>
3. Woo, M. W., Wong, P., Tang, Y., Triacca, V., Gloor, P. E., Hrymak, A. N., & Hamielec, A. E. (1995), «Melting behavior and thermal properties of high density polyethylene», *Polymer Engineering and Science*, 35(2), 151–156. <https://doi.org/10.1002/pen.760350205>
4. Marinho, V. A. D., Cesario, L. V., Costa, A. R. M., Carvalho, L. H., Almeida, T. G., & Canedo, E. L. (2019), «Heat transfer coefficient in internal mixers for different polymers and processing conditions», *Chemical Engineering Research and Design*, 152, 466–473. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2019.09.025>
5. Carneiro, O. S., Nóbrega, J. M., Mota, A. R., & Silva, C. (2013), «Prototype and methodology for the characterization of the polymer-calibrator interface heat transfer coefficient», *Polymer Testing*, 32(6), 1154–1161. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2013.07.006>
6. Michaeli, Walter (1992), «Extrusion Dies for Plastics and Rubber: Design and Engineering Computations. Computer Aided Engineering for Polymer Processing», *Hanser Publishers*, 1992. – p. 340.
7. Dvoinos, Y. G., Podyman, G. S., & Rudnytskyi, B. A. (2020), «Calculation of heat exchange processes during calendaring of polyethylene sheets». *Proceedings of the NTUU «Igor Sikorsky KPI». Series: Chemical engineering, ecology and resource saving*, (4), 9–16. <https://doi.org/10.20535/2617-9741.4.2020.219779> [In Ukrainian]